

ESTUDIO MORFOLÓGICO DEL PERFIL DE PLAYA: MODELO DE PERFIL DE EQUILIBRIO EN DOS TRAMOS

A.M. Bernabeu¹, R. Medina², C. Vidal² y J.J. Muñoz-Pérez³

¹ Departamento. de Geociencias Marinas, Facultad de Ciencias, Universidad de Vigo, 36200 Vigo, (bernabeu@uvigo.es).

² Departamento. de Ciencias y Técnicas del Agua y del M. A., Universidad de Cantabria, 39005 Santander.

³ Departamento. de Física Aplicada, Facultad Ciencias del Mar, Universidad de Cádiz, 11510 Puerto Real.

Resumen: El concepto de perfil de equilibrio es una herramienta útil en el estudio de la morfodinámica de playas. Teniendo en cuenta los diferentes procesos dinámicos que afectan al perfil (rotura y asomeramiento), se propone un modelo de perfil de equilibrio, siguiendo la idea propuesta por Inman *et al.* (1993): perfil en dos tramos. Este modelo ajusta una expresión al tramo de rotura, donde la disipación de energía se debe a la rotura del oleaje y otra expresión al tramo de asomeramiento, donde la disipación se debe a la fricción del oleaje con el lecho. Las formulaciones obtenidas asocian un coeficiente (A y C) a cada tramo del perfil. Dichos coeficientes están asociados al fenómeno de disipación energética y recogen información sobre la morfología del perfil. La validación del modelo con datos de perfiles reales distribuidos a lo largo de la costa española permitió establecer relaciones entre los coeficientes de forma y los parámetros hidrodinámicos y sedimentarios (fundamentalmente, oleaje y tamaño de grano). Dichas relaciones le confieren al modelo capacidad predictiva: conocido el oleaje incidente y el tamaño de grano de una playa, el perfil en dos tramos permite conocer la morfología del perfil de playa resultante.

Palabras Clave: perfil de equilibrio, oleaje, tamaño de grano, costa española

Abstract: The equilibrium profile concept is a useful tool in beach morphodynamics studies. Considering the different dynamics processes that operate along the profile (breaker and shoaling), it is proposed a new equilibrium profile model: two-sections profile. This model fits an expression to the breaker section, where the dissipation is due to the breaker turbulence and other expression to the shoaling section, where the dissipation is due to bottom friction. The obtained formulations associate a dissipation coefficient (A and C) with each section. These coefficients are associated with energy dissipation and hold important morphological information built-in. The model was validated with profiles measured in natural occurring beaches along the Spanish coast. The relationships between the form coefficients (A and C) and the hydrodynamic and sedimentary characteristics were also established, using the Dean parameter, $\Omega=H/wT$. These relationships give to the model a predictive capacity: knowing the incident waves and the grain size of the beach, the 2-section model predicts the resultant beach profile morphology.

Key words: equilibrium beach profile, wave climate, grain size, Spanish coast

Bernabeu, A.M., Medina, R., Vidal, C. y Muñoz-Pérez, J.J. (2001): Estudio morfológico del perfil de playa: modelo de perfil de equilibrio en dos tramos. *Rev. Soc. Geol. de España*, 14 (3-4): 227-236.

Existe, en los últimos años, una tendencia creciente a abordar el estudio de los procesos geológicos compatibilizando el tratamiento clásico de estos problemas con un intento por modelarlos a través de expresiones ampliamente conocidas en otros ámbitos de las Ciencias, teniendo como fin último la cuantificación de estos fenómenos y la determinación de los factores que los controlan.

La modelación matemática de fenómenos naturales litorales ha sido hasta ahora el campo de trabajo de la ingeniería de costas. Su utilidad y aplicación es amplia, pero su planteamiento requiere una simplificación importante del fenómeno estudiado. Hasta ahora, dicha simplificación ha ido en detrimento de los aspectos geológicos, potenciando la influencia de los factores hidrodinámicos. Por ello, estos modelos han sido muy

criticados desde el punto de vista de la geología clásica (Pilkey *et al.*, 1993; Carter y Woodroffe, 1994; Thielert *et al.*, 1995, 2000).

Actualmente, se están llevando a cabo esfuerzos importantes por integrar las variables geológicas en la descripción de estos modelos matemáticos en el campo de la morfodinámica de playas. Así, Muñoz-Pérez *et al.* (1999) presenta un modelo de perfil de playa donde analiza la influencia de un afloramiento rocoso horizontal situado en la zona submareal. Recientemente, Galofré y Medina (2001) analizan la influencia que la distribución granulométrica de la arena de una playa tiene en su morfología y comportamiento.

El objetivo principal de este trabajo es mostrar el potencial de este nuevo tratamiento en algunos campos de la dinámica sedimentaria, donde la incorporación de

datos y conceptos propios de esta ciencia confiere un poder excepcional a las herramientas ingenieriles al dotarlas de un significado geológico preciso, permitiendo su uso en el ámbito científico y práctico.

El concepto de perfil de equilibrio.- En el estudio y seguimiento de playas se asume, de forma implícita, una hipótesis simplificativa considerando como modos de transporte independientes el transporte transversal y longitudinal de sedimentos. Esta simplificación permite introducir dos conceptos morfológicos importantes: la forma en planta y el perfil de playa.

Numerosos trabajos han puesto de manifiesto la importancia que tienen las características y evolución morfológica del perfil de playa para interpretar los procesos costeros y, como consecuencia, para una gestión apropiada del litoral (Dean, 1991; Bodge, 1992; Inman *et al.*, 1993). Así, el perfil de playa es la base tanto para modelos hidrodinámicos que contemplan la evolución del oleaje durante el asomeramiento y rotura, el origen y generación de las corrientes costeras y el transporte de sedimento asociado, como para modelos morfodinámicos donde se analiza la evolución morfológica de la playa o los cambios en la línea de costa, teniendo como ejemplo los modelos GENESIS (Hanson y Kraus, 1989) y SBEACH (Larson y Kraus, 1989).

El perfil de playa puede presentar morfologías variadas a lo largo de la costa. Sin embargo, todos los perfiles mantienen una tendencia general similar, con una mayor pendiente en la zona cercana a la línea de costa y una disminución progresiva de dicha pendiente hacia mar adentro. Esta regularidad ha permitido el desarrollo de diferentes modelos matemáticos que describen, con diferente grado de acierto, un perfil de playa; así como la introducción del concepto de perfil de equilibrio. Larson (1991) define el perfil de equilibrio como la morfología que alcanzará un perfil de playa expuesto a unas condiciones de oleaje constantes, fundamentalmente altura de ola y período, y compuesto por un tamaño de grano determinado. Este concepto asume que las playas responden a las características del oleaje y sedimentológicas ajustando su perfil a una forma que no varía con el tiempo, donde el transporte transversal de sedimento promediado en el tiempo es nulo.

Según esta definición, la existencia de un perfil de equilibrio estático en la Naturaleza es prácticamente imposible, debido a las variaciones constantes de los distintos agentes actuantes (oleaje, marea, corrientes). En sentido estricto, el perfil de equilibrio es un concepto teórico que únicamente será posible alcanzar en el laboratorio, donde las condiciones están controladas. Sin embargo, tal y como indicaba González Rodríguez (1995), las variaciones de los parámetros hidrodinámicos y sedimentológicos en una playa están restringidas a un rango de valores conocidos, por lo que la variabilidad del perfil está limitada. De este modo, existe una morfología del perfil de playa que se presentará con mayor frecuencia, estado modal del perfil de playa, y que consideramos como el perfil de equilibrio dinámico de la playa.

El concepto de perfil de equilibrio es una herramienta útil en el estudio de la morfodinámica de playas, presentando dos aplicaciones principales, una como herramienta de cuantificación y otra como modelo de predicción. Así, en el estudio y seguimiento temporal de una playa, permite cuantificar los cambios morfológicos de primer orden que sufre la misma durante el período de muestreo, fundamentalmente variaciones en la pendiente y en el grado de concavidad del perfil. De este modo, podemos establecer la relación de causalidad entre la morfología del perfil y las condiciones hidrodinámicas (variaciones de altura de ola y período) y sedimentológicas (granulometría y textura) que determinan dicha morfología. Las correlaciones obtenidas confieren una capacidad predictiva al perfil de equilibrio que lo han convertido en una herramienta fundamental en el ámbito de la gestión del litoral. Así, es particularmente útil en el análisis del impacto que las obras ingenieriles (construcción o ampliación de puertos, diques de protección, escolleras, etc.) tienen sobre los procesos de erosión costera o en la determinación, de forma más precisa, del volumen de arena necesario y el coste final de una obra de protección *blanda* como es la regeneración de una playa. Así, el perfil de equilibrio permite analizar los efectos que los cambios en el tamaño de grano de una playa, las variaciones del nivel del mar (Brunn, 1962) o las actuaciones antrópicas tienen sobre la morfología de la playa y, en general, sobre el litoral.

Existen numerosas expresiones del perfil de equilibrio de playa, variando desde una relación lineal simple hasta complicadas relaciones empíricas (Brunn, 1954; Dean, 1977; Bodge, 1992; Komar y McDougal, 1994; Muñoz-Pérez, 1996). Uno de los modelos más utilizados es el perfil de Dean ($h = A \times x^{2/3}$, siendo h la profundidad; x la distancia a la línea de costa y A un coeficiente de forma) tanto por su simplicidad matemática, ya que depende de un único coeficiente de ajuste, como por haber sido contrastado con aproximadamente 500 perfiles medidos a lo largo de la costa estadounidense. A pesar de los esfuerzos llevados a cabo, ninguno de estos modelos es capaz de representar algunas de las características más conocidas del perfil de playa, tales como la interacción existente entre la zona de asomeramiento y la zona de rompientes del perfil, la influencia del clima marítimo (perfiles de invierno-verano) o de la marea en la forma de equilibrio, la importancia de las características texturales de la arena en el comportamiento de una playa o la presencia de barras en el perfil litoral. Bernabeu Tello (1999) desarrolla un modelo de perfil de equilibrio que resuelve alguno de estos aspectos.

Este modelo propone la existencia de dos tramos diferenciados en el perfil, asociados a distintos procesos hidrodinámicos, básicamente rotura y asomeramiento. Dichos procesos generan la disipación de la energía del oleaje incidente sobre el perfil por turbulencia y por fricción con el fondo, respectivamente. Estos dos tramos quedan articulados sobre el punto de rotura del oleaje. El modelo propuesto fue validado con datos de campo recogidos a lo largo de la costa española, lo

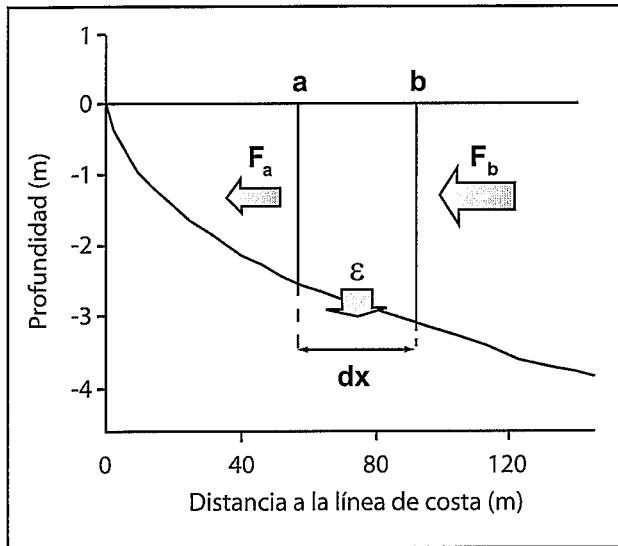


Figura 1.- Variación del flujo de energía incidente del oleaje a lo largo del perfil de playa. F_b es el flujo de energía incidente que atraviesa la sección b , F_a es el flujo de energía incidente que atraviesa la sección a , ϵ es la disipación de energía incidente producida entre las secciones a y b del perfil.

cual permitió utilizar el modelo analítico para estimar la morfología del perfil y establecer relaciones predictivas entre la morfología y las características hidrodinámicas y sedimentológicas de la playa. En este trabajo se exponen los resultados obtenidos de este estudio.

Resultados

Formulación física del modelo

El punto de partida del modelo es la ecuación del balance energético a lo largo del perfil. Esta ecuación

describe la evolución del flujo de energía entre dos secciones consecutivas del perfil, secciones a y b en la figura 1. Así, la diferencia entre el flujo de energía que atraviesa la sección a , F_a , y la sección b , F_b , es debida a los diferentes procesos de disipación de la energía incidente (principalmente, turbulencia debida a la rotura y fricción con el fondo). Para el caso ideal de batimetría regular, con isobatas rectas y paralelas, esta aproximación se expresa como:

$$\frac{dF}{dx} = \frac{F_b - F_a}{b - a} = -\epsilon \quad (1)$$

donde F es el flujo total de energía que atraviesa una sección del perfil en la dirección normal a la costa, ϵ es la disipación por unidad de área y dx es el incremento de distancia a la costa. F_a y F_b son el flujo total que atraviesa la sección a y b , respectivamente.

Teniendo en cuenta la definición de flujo de energía, $F = \frac{1}{8} \rho g h^2 \sqrt{gh}$, donde ρ es la densidad y g es la gravedad, la ecuación de balance energético relaciona tres parámetros importantes: Altura de ola (H), profundidad (h) y disipación (ϵ). Esto ha permitido desarrollar, a partir de la ecuación (1), modelos capaces de describir el comportamiento de cada uno de estos parámetros, conocidos los dos restantes. Un modelo de perfil de equilibrio trata de definir la variación de profundidad o morfología del perfil de playa. Por ello, será necesario asumir un modelo de evolución de la altura de ola y de la disipación de la energía a lo largo del perfil conocidos, que permitan la resolución de la expresión (1).

Thornton y Guza (1983) estudiaron los procesos predominantes de disipación de la energía incidente al aproximarse el oleaje a la costa. El resultado principal

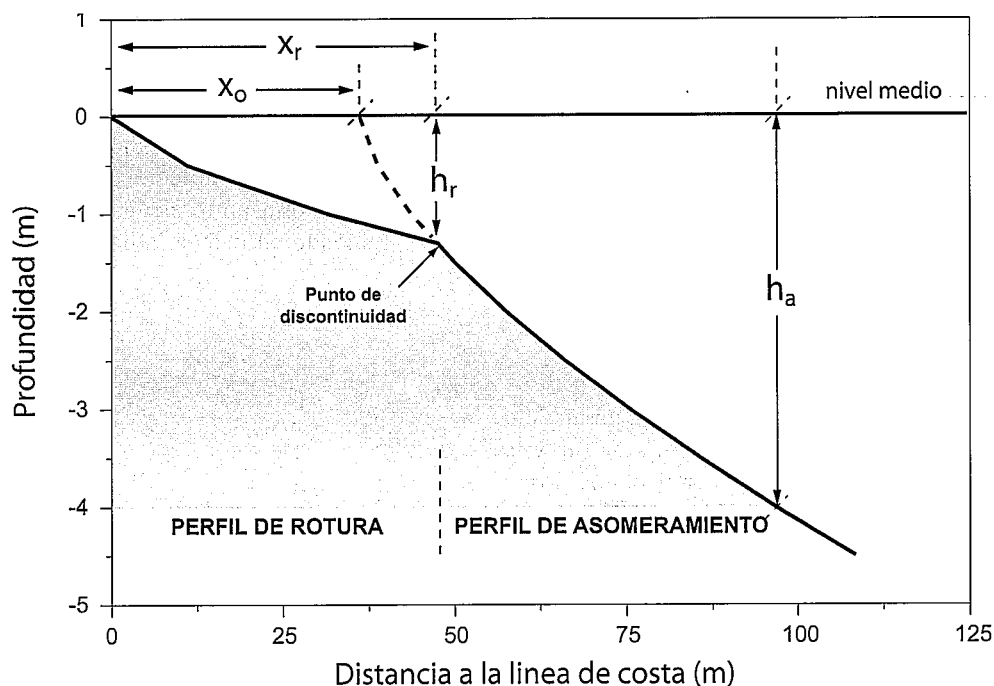


Figura 2.- Esquema del modelo de perfil de equilibrio en dos tramos propuesto: x_r es la distancia horizontal entre el inicio del perfil de rotura sobre la línea de costa y el punto de separación del perfil, h_r es la profundidad del punto de separación, x_o define el desplazamiento del perfil de asomeramiento respecto a un sistema de referencia situado sobre la línea de costa, h_a profundidad límite de validez del modelo propuesto.

incluía la disipación debida a los procesos de asomeramiento, ε_r , y de rotura del oleaje, ε_r , expresado como:

$$\varepsilon = \varepsilon_r + \varepsilon_f \quad (2)$$

Estos autores obtuvieron una relación entre la disipación de energía debida a la rotura de las olas y a la fricción del oleaje con el fondo tal que, dentro de la zona de rompientes, la rotura es la forma principal de disipación de energía. En la zona del perfil donde las olas no han comenzado a romper ($\varepsilon_r=0$), la disipación se debe a la fricción con el fondo.

Por tanto, teniendo en cuenta los distintos procesos de disipación de energía a lo largo del perfil, parece adecuado tratar de modo independiente cada una de estas zonas (rotura y asomeramiento) y desarrollar un modelo que refleje la importancia de cada uno de estos fenómenos sobre la morfología del perfil. Siguiendo el trabajo de Inman *et al.* (1993), se ha desarrollado un modelo de perfil de equilibrio en dos tramos: perfil de rotura y perfil de asomeramiento. La intersección entre ambos tramos coincide con el punto de rotura, que dentro del modelo denominamos punto de separación, ya que dicho punto marca el límite entre la acción del asomeramiento y de la rotura sobre el perfil.

En la figura 2 se presenta un esquema del modelo y de sus parámetros característicos. En la dimensión horizontal, el parámetro x_r es la distancia entre el inicio del perfil de rotura y el punto de separación y el parámetro x_0 marca la distancia entre el inicio del perfil de rotura y el inicio *virtual* del perfil de asomeramiento sobre el nivel medio del mar. En el eje vertical, h_r es la profundidad a la que se localiza el punto de separación y la profundidad h_a determina el límite exterior del perfil de equilibrio, siendo función de la altura de ola significativa que alcanza la playa. Esta profundidad define el límite hasta el cual se cumplen las hipótesis de partida del modelo. La primera de ellas considera que la onda viaja por profundidades reducidas, lo cual se cumple cuando la relación entre la profundidad de la columna de agua y la longitud de la onda toma valores menores que 0,04 y que tiene implicaciones importantes en el comportamiento de la onda durante su propagación. La segunda de estas hipótesis considera como modelo de ondas la teoría lineal y trabaja con las expresiones definidas por ésta.

Perfil de equilibrio en dos tramos

La resolución de la ecuación (1) requiere un modelo de disipación y una relación entre la altura de ola y la profundidad para cada punto del perfil conocidos *a priori*. Ambos modelos deben especificarse para los tramos del perfil definidos.

Perfil de rotura: En condiciones de equilibrio, se puede asumir que la energía de la onda en la zona de rompientes se encuentra saturada. Es decir, una onda propagándose hacia la costa varía su altura debido al fenómeno de asomeramiento, hasta alcanzar un valor crítico a partir del cual se hace inestable y rompe, disipando el

exceso de energía. Por tanto, para una profundidad dada, existe un límite tanto de la altura de ola posible como de disipación de energía (Horikawa y Kuo, 1966; Thorton y Guza, 1983). Esta hipótesis puede formularse como:

$$\varepsilon_r = D_r^* h \quad (3)$$

$$H = \gamma h \quad (4)$$

donde D_r^* es la disipación por unidad de volumen, H es la altura de ola y h es la profundidad, γ y ε_r son valores constantes. Introduciendo ambos modelos en la ecuación de balance energético, ecuación (1), y asumiendo teoría lineal de ondas, integramos para obtener:

$$h = A x^{2/3} \quad \text{para } 0 \leq x \leq x_r \quad (5)$$

$$\text{donde: } A = \left[\frac{24 D_r^*}{5 \rho g^3 \gamma^2} \right] \quad (6)$$

donde ρ es la densidad del fluido y g la aceleración de la gravedad. El desarrollo completo del modelo propuesto en este trabajo puede encontrarse en Bernabeu Tello (1999). El parámetro A , obtenido para el tramo de perfil de rotura, coincide con el propuesto por Dean (1977) en su modelo. Este coeficiente es un factor de forma dimensional ($m^{1/3}$) del perfil y aparece como función del proceso de disipación de energía (D_r^*). La dependencia de este parámetro con el tamaño de grano fue establecida experimentalmente por Dean (1987).

Perfil de asomeramiento: Fuera de la zona de rompientes, la propagación del tren de ondas genera una tensión tangencial media sobre el lecho, τ_r . La capacidad del oleaje de transportar sedimento se debe en gran medida a este parámetro, existiendo un valor crítico de tensión tangencial por encima del cual se inicia el movimiento de los granos del lecho (Shields, 1936). A partir de aquí, los modelos describen la tasa de transporte proporcional a la tensión tangencial máxima generada por el movimiento oscilatorio (Meyer-Peter y Müller, 1948; Bagnold, 1963; Van-Rijn, 1984).

Brunn (1954) estableció que, en condiciones de equilibrio, el transporte medio de sedimento debía ser nulo. Teniendo en cuenta la definición de tensión tan-

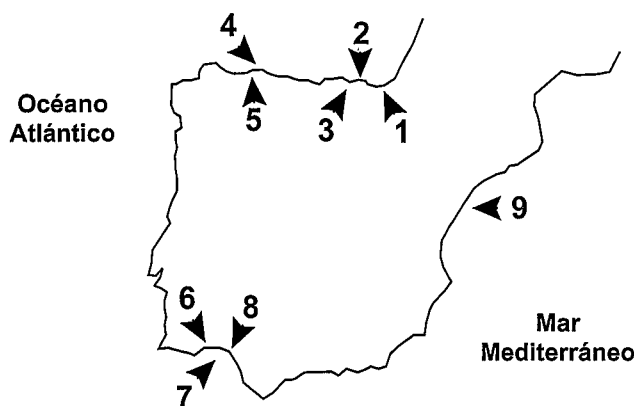


Figura 3.- Localización de las playas estudiadas.

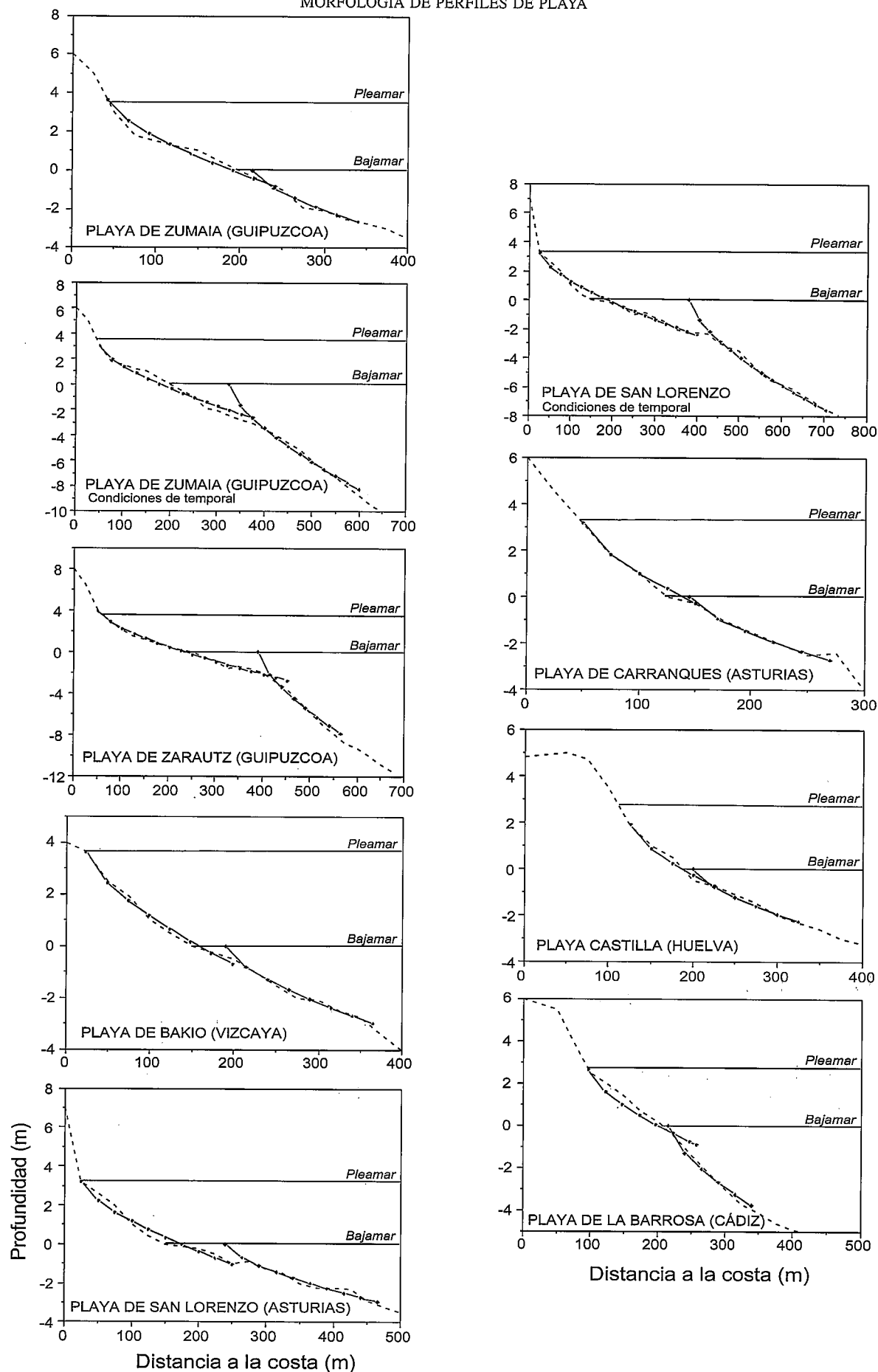


Figura 4.- Ajuste del perfil de rotura y de asomeramiento: 1) playa de Zumaia; 2) playa de Zumaia en condiciones de temporal; 3) playa de Zarautz; 4) playa de Bakio; 5) playa de San Lorenzo; 6) playa de San Lorenzo en condiciones de temporal; 7) playa de Carranques; 8) playa de Castilla; 9) playa de La Barrosa.

gencial y para un coeficiente de fricción con el fondo constante, la disipación debida a la fricción (ε_f) será también constante, cumpliéndose que:

$$\varepsilon_f = D_f^* = \text{cte} \quad (7)$$

donde D_f^* es la disipación de energía debida a la fricción con el fondo por unidad de área.

Asumiendo teoría lineal de ondas y profundidades reducidas, obtenemos la relación entre la altura de ola y la profundidad, para el tramo de asomeramiento:

$$H = \beta \quad h \quad (8)$$

donde β es una constante. Sustituyendo estas expresiones (7) y (8) en la ecuación de balance energético, ecuación (1), integramos esta expresión entre dos puntos del perfil: el punto de intersección entre perfil de rotura y perfil de asomeramiento (x_r , h_r), representado en la figura 2, y un punto cualquiera (x , h) del perfil, que cumpla que $x > x_r$, obteniendo:

$$X = x - x_0 = \left(\frac{h}{C} \right)^2 \quad (9)$$

$$C = \left[8 c_f H_a h_a \right]^{2/3} \quad (10)$$

PLAYA	H_s (m)	T_p (s)	RANGO DE MAREA (m)	D_{50} (mm)	
				Perfil de rotura	Perfil de asomeramiento
Zumaia	0.82	9.73	3.65	0.44	0.30
Zumaia (T)	2.56	12.67	3.65	0.44	0.30
Zarautz	1.94	12.68	3.65	0.35	0.25
Bakio	0.94	9.10	3.65	0.30	0.23
San Lorenzo	0.80	7.41	3.25	0.34	0.25
San Lorenzo (T)	2.3	11.68	3.25	0.34	0.25
Carranques	0.58	8.89	3.25	0.36	0.23
Castilla	0.63	6.95	2.65	0.35	0.20
La Antilla	0.76	9.71	2.65	0.35	0.22
La Barrosa	0.82	8.58	2.65	0.33	0.23
El Vendrell	0.54	6.9	0.40	0.27	0.19

Tabla I.- Parámetros de oleaje, marea y tamaño de grano correspondientes a cada uno de los perfiles estudiados. (T) hace referencia a condiciones de temporal.

La expresión obtenida para el perfil de asomeramiento coincide, de nuevo, con el perfil de Dean, desplazado una distancia x_0 del sistema de referencia situado sobre la línea de costa o inicio del perfil de rotura (Fig. 2). El parámetro C es un coeficiente de forma del perfil que depende del valor de altura de ola que tenemos en el límite exterior del perfil de asomeramiento, H_a , y del coeficiente de fricción con el fondo, c_f . Por tanto, este modelo propone que la morfología del perfil de equilibrio, en el tramo afectado por asomeramiento, no dependerá exclusivamente del tamaño de grano de la arena de la playa, como apunta Dean (1987), sino también de las condiciones de oleaje que afectan al perfil.

Verificación del modelo de perfil de equilibrio en dos tramos con datos reales

El modelo de perfil de equilibrio propuesto fue contrastado con los datos de perfiles de playa medidos a lo largo de la costa española. Tanto los perfiles de playa

como las características sedimentarias, se extrajeron del trabajo de Gómez-Pina (1995). En la figura 3 se presenta la localización geográfica de las playas estudiadas, siguiendo la siguiente numeración:

1. Playa de Zumaia (Guipúzcoa)
2. Playa de Zarautz (Guipúzcoa)
3. Playa de Bakio (Vizcaya)
4. Playa de San Lorenzo (Asturias)
5. Playa de Carranques (Asturias)
6. Playa de La Antilla (Huelva)
7. Playa de Castilla (Huelva)
8. Playa de la Barrosa (Cádiz)
9. Playa del Vendrell (Tarragona)

En cada una de estas playas se eligió un perfil representativo en la zona central de la playa para evitar, en la medida de lo posible, el efecto de los salientes costeros sobre el oleaje. De este modo, podemos asumir que la evolución del oleaje a lo largo del perfil es debida, fundamentalmente, a las características batimétricas y sedimentarias del mismo.

En el estudio del perfil de equilibrio, la característica sedimentaria más importante es el tamaño de grano de la arena de la playa. La distribución de tamaños en una muestra de sedimento puede variar ampliamente, siendo importante definir un tamaño de grano característico. En el ámbito de la morfodinámica de playas, el parámetro más utilizado es la mediana (D_{50}) de la distribución granulométrica. En los perfiles analizados, el tamaño de grano se obtuvo promediando los valores de todas las muestras recogidas en cada una de las playas, definiendo un valor para la zona intermareal y otro valor para la zona sumergida (Tabla I). Estos valores irán asociados al perfil de rotura y de asomeramiento, respectivamente, descritos en el modelo propuesto.

Para caracterizar el clima marítimo asociado a cada una de las playas del estudio, se utilizaron dos fuentes. Por un lado, los datos de altura de ola significativa y período de pico, registrados por las boyas de la Red Española de Medida y Registro de Oleaje (REMRO) y, por otro lado, el código ROM 0.3-91 Oleaje. Anejo I: Clima Marítimo en el Litoral Español (MOPTMA,

PLAYAS	PERFIL DE ROTURA			PERFIL DE ASOMERAMIENTO		
	A	Ω_{em}	PENDIENTE MEDIA	C	Ω_{sum}	PENDIENTE MEDIA
Zumaia	0.13	1.52	0.02	0.106	2.32	0.016
Zumaia (T)	0.119	3.64	0.02	0.195	5.55	0.025
Zarautz	0.1225	3.55	0.01714	0.25	5.10	0.042
Bakio	0.138	2.84	0.01751	0.095	3.80	0.014
San Lorenzo	0.114	2.58	0.01867	0.8	3.63	0.01143
S. Lorenzo (T)	0.108	4.71	0.01375	0.16	6.63	0.016
Carranques	0.167	1.47	0.0355	0.108	2.40	0.0225
La Barrosa	0.12	2.37	0.02422	0.15	3.51	0.032
Castilla	0.121	2.10	0.026	0.09	3.89	0.0152
Antilla	0.13	1.81	0.02361	0.0833	3.02	0.01333
El Vendrell	0.188	2.41	0.07333	0.182	3.56	0.044

Tabla II.- Coeficientes de ajuste del modelo para el tramo de rotura (A) y de asomeramiento (C), pendiente media de cada uno de los tramos y parámetro de Dean calculado para las playas estudiadas.

1991), de donde se obtuvo la dirección de mayor frecuencia de presentación. Los datos de altura de ola y período considerados correspondían a la altura de ola significativa y el período de pico medios del mes anterior a la toma del perfil, propagados hasta la profundidad de cierre de cada una de las playas (Tabla I).

El modelo de perfil de equilibrio propuesto, defini-

cada uno de los tramos de los perfiles estudiados, tabla 2, con los valores obtenidos para los coeficientes de forma, A y C. En la figura 5 se representan ambos parámetros junto con el mejor ajuste a los datos que viene definido por las siguientes expresiones:

$$A = 0.1 + 1.3 m \quad (11)$$

$$C = 0.05 + 3.93 m \quad (12)$$

La morfología de una playa viene determinada fundamentalmente por las condiciones de oleaje y tamaño de grano (Larson, 1991). Así, se analizó la relación entre dichas variables y los coeficientes de forma del perfil, (Fig. 6). Para ello, se utilizó el parámetro de Dean, ampliamente usado en estudios de morfodinámica de playas (Wright y Short, 1984; Masselink y Short, 1993), que relaciona el tamaño de grano y el clima marítimo: $\Omega = H/wT$, donde H es la altura de ola, T es el período de onda asociado y w es la velocidad de sedimentación. Puesto que el tamaño de grano varía entre el perfil de rotura y el perfil de asomeramiento, tal y como vemos en la tabla I, se definió un valor del parámetro Ω para cada uno de estos tramos, Ω_{em} asociado al perfil de rotura y Ω_{sm} asociado al perfil de asomeramiento. Para

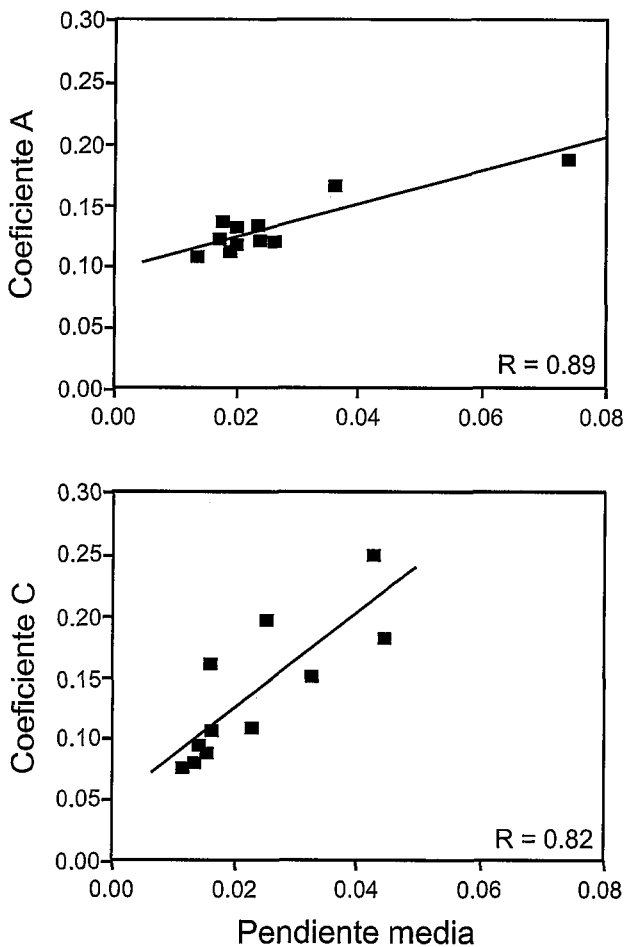


Figura 5.- Relación entre la pendiente media y a) el parámetro A, para el perfil de rotura; b) el parámetro C, para perfil de asomeramiento.

do por las expresiones (5) y (9), se ajustó a los perfiles medidos, diferenciando entre el perfil de rotura y el perfil de asomeramiento. En la figura 4 se presentan dichos ajustes para nueve de las playas estudiadas. A pesar de que los modelos de perfil de equilibrio existentes ajustan el perfil de playa con una única curva, en la figura 4 se puede observar como la aproximación en dos tramos refleja mejor la morfología de los perfiles. El modelo propuesto permite identificar el punto de separación entre ambos tramos que marca un cambio de pendiente dentro del perfil. En la tabla II se presentan los valores de mejor ajuste de los coeficientes de rotura y de asomeramiento, A y C respectivamente.

El perfil de equilibrio permite cuantificar y predecir el comportamiento del perfil de playa. Las expresiones teóricas son capaces de caracterizar la morfología de primer orden del perfil, definida por la pendiente de la playa. Por ello, se comparó la pendiente media, m, de

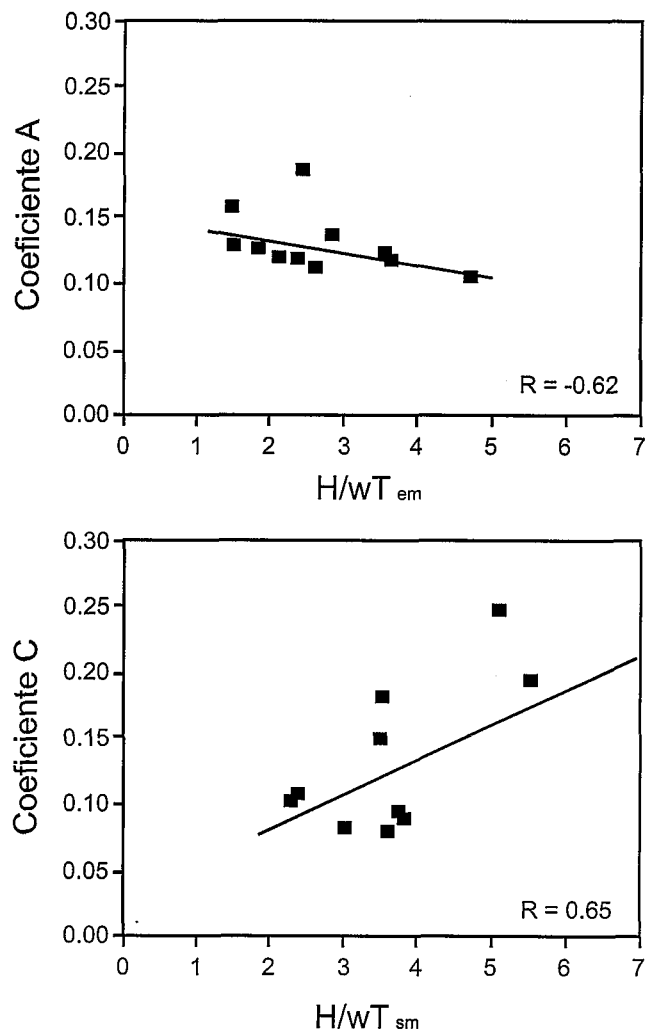


Figura 6.- Ajuste entre el parámetro adimensional, $W = H/wT$, y a) el parámetro A, para el perfil de rotura; b) el parámetro C, para perfil de asomeramiento.

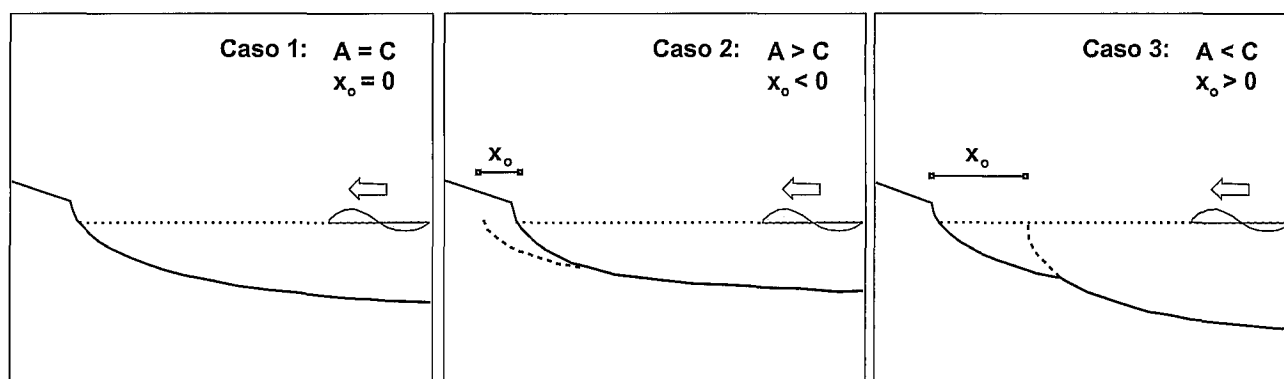


Figura 7.- Esquema de las morfologías posibles del perfil en dos tramos en función de la relación entre los coeficientes de forma A y C.

el rango de valores $1 \leq \Omega \leq 5$, en el que se encontraban las playas estudiadas, se obtuvieron las siguientes expresiones de ajuste:

$$A = 0.15 - 0.009 \Omega_{em} \quad (13)$$

$$C = 0.03 + 0.03 \Omega_{sm} \quad (14)$$

Discusión

El modelo en dos tramos propuesto permite tratar de forma separada las partes del perfil de playa sometidas a procesos hidrodinámicos distintos. La diferenciación entre el tramo de rotura y el tramo de asomeramiento permite aproximar mejor la morfología del perfil de playa frente al resto de formulaciones del perfil de equilibrio que utilizan una única curva. Esto es debido a su capacidad para describir la inflexión en la pendiente producida en el punto de rotura del oleaje. La comparación con datos reales valida la formulación teórica, mostrando un buen ajuste del modelo en dos tramos a los perfiles medidos (Fig. 4).

El análisis de los coeficientes de forma, A y C, asociados a cada tramo del perfil ha permitido establecer relaciones útiles en la descripción y predicción de la morfología del perfil de playa. La figura 5 muestra el ajuste lineal existente entre dichos coeficientes y la pendiente media del perfil. Cuanto mayor es la pendiente media del tramo correspondiente, rotura o asomeramiento, mayores valores toma el coeficiente de forma. El modelo en dos tramos propuesto, articulado sobre el punto de rotura, permite reflejar el cambio de pendiente que sufre el perfil sobre dicho punto a través de sus coeficientes de ajuste (Fig. 7) pudiendo de este modo cuantificar la morfología de la playa.

La comparación de los coeficientes A y C con el parámetro adimensional de Dean, Ω , establece una relación entre la morfología y la hidrodinámica que afecta a la playa, definiendo la influencia del clima marítimo en la forma de equilibrio. Así, la respuesta del perfil de rotura y del perfil de asomeramiento frente a las condiciones de oleaje y sedimentarias es distinta. Mientras para el tramo de rotura, el coeficiente A disminuye al aumentar Ω ; en el tramo de asomeramiento, el coeficiente C aumenta con Ω . Para condiciones disipativas, valores altos de \bar{U} , el perfil

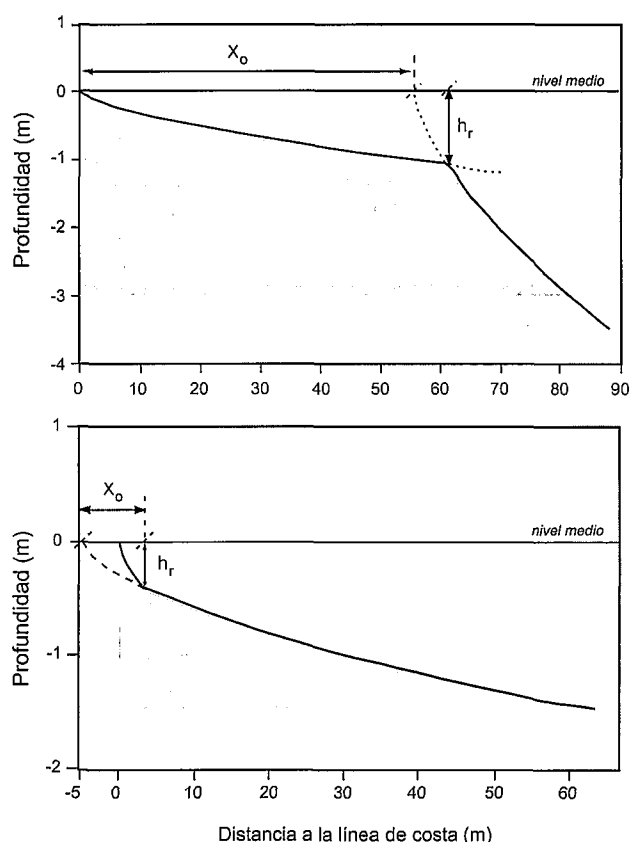


Figura 8.- Perfil en dos tramos para condiciones a) disipativas y b) reflectivas

de rotura adquiere una pendiente tendida mientras que el perfil de asomeramiento tiene una pendiente muy marcada. En este caso, la discontinuidad asociada al punto de rotura aparece bien definida en el perfil (Fig. 8a). Para condiciones más reflectivas, valores bajos de Ω , el comportamiento se invierte. La morfología del perfil de playa viene caracterizada por un tramo inicial del perfil de rotura con pendiente pronunciada y un tramo sumergido más suave. Esto confiere una mayor concavidad al perfil completo, donde el punto de separación es difícil de identificar.

Las relaciones establecidas entre las variables dinámicas y las variables morfológicas, ecuaciones (13) y (14), son expresiones potencialmente predictivas: conocidas las condiciones dinámicas que afectan a una playa y su tama-

ño de grano característico podremos predecir la morfología del perfil. El perfil de equilibrio en dos tramos junto con las expresiones de ajuste obtenidas permite analizar y prever los efectos sobre el perfil de playa de la variación de distintos parámetros (cambios en el tamaño de grano, variación del nivel del mar, variaciones estacionales o por actuaciones antrópicas del oleaje que alcanza la playa).

Conclusiones

En este trabajo, se propone un modelo de perfil de equilibrio aplicable a playas desde reflectivas a disipativas. Se han diferenciado distintas zonas del perfil en función de los principales procesos dinámicos: perfil de rotura y perfil de asomeramiento, coincidiendo ambos en el punto de rotura. Se obtuvo una formulación analítica para cada tramo, ecuaciones (5) y (9), que supone una mejora respecto a los modelos existentes puesto que es capaz de representar características del perfil, como el cambio de pendiente en el punto de rotura o la influencia del oleaje en la morfología, que hasta ahora no se habían modelado.

La comparación del modelo con perfiles medidos permitió su validación y la determinación de la información morfológica recogida por cada uno de los coeficientes de ajuste del perfil. La correlación entre la morfología del perfil y las condiciones hidrodinámicas permite determinar la influencia del oleaje sobre la forma de equilibrio, obteniendo expresiones predictivas capaces de determinar la morfología que adoptará el perfil en función de las características sedimentarias y de las condiciones de clima marítimo que afecten a la playa.

El modelo de perfil de equilibrio en dos tramos presentado se propone como una herramienta útil en el seguimiento de playas, permitiendo cuantificar la evolución morfológica del perfil a lo largo del tiempo y en la gestión del litoral para evaluar y predecir procesos de erosión debidos tanto a factores naturales (ascenso del nivel del mar, acción de temporales, etc.) como antrópicos (construcción de infraestructuras costeras, extracción de áridos).

Agradecimientos

Agradecer a la Dirección General de Costas (Ministerio de Medio Ambiente) la cesión de los datos de campo utilizados en este trabajo. Expresar también nuestro agradecimiento al Dr. M. Soria y al Dr. J.M. Morales por sus útiles comentarios a un manuscrito previo y al Dr. J. Serra y al Dr. J. Guillén por sus comentarios al manuscrito final que nos han servido para mejorar este trabajo. Este trabajo es el nº 227 del grupo EX1 de la Universidad de Vigo, siendo una contribución a los proyectos: REN2000-1102 MAR (CICYT) y PGIDT00MAR30103PR (Xunta de Galicia) y parcialmente al PGIDT00PXI30105PR (Xunta de Galicia) e IGCP 464. R. M y C. V. quieren agradecer la financiación recibida a través del proyecto de investigación AMB99-0543 (CICYT).

Referencias

- Bagnold, R. A. (1963): Mechanics of marine sedimentation. En: *The Sea: Ideas and observations*, 3 (M. N. Hill, Ed.) Wiley-Interscience, New York, 507-528.
- Bernabeu Tello, A. M. (1999): *Desarrollo, validación y aplicaciones de un modelo general de perfil de equilibrio en playas*. Tesis doctoral, Univ. de Cantabria, 170 p.
- Bodge, K. (1992): Representing equilibrium beach profiles with an exponential expression. *Journal of Coastal Research*, 8-1: 47-55.
- Bruun, P. (1954): Coast erosion and the development of beach profiles. *Beach Erosion Board, Technical Memorandum*, Nº 44, 75 p.
- Brunn, P. (1962): Sea-level rise as a cause of storm erosion. *Journal of Waterways, Port, Coastal and Ocean Engineering*, 88: 117-130.
- Carter, R. W. G. y Woodroffe, C. D. (1994): Coastal evolution: an introduction. *Coastal evolution: Late Quaternary Shoreline Morphodynamics*. Cambridge University Press, Cambridge: 1-31.
- Dean, R.G. (1977): Equilibrium beach profiles: U.S. Atlantic and Gulf coasts. *Ocean Engineering Report Nº 12*, University of Delaware, 45 p.
- Dean, R. G. (1987): Coastal sediment processes: Toward engineering solutions. En: *Proceedings of Coastal Sediments '87*: 1-24
- Dean, R.G. (1991): Equilibrium beach profiles: Characteristics and applications. *Journal of Coastal Research*, 7: 53-84.
- Galofré, J. y Medina, R. (2001): Compatibilidad del material de aportación en regeneración de playas: Revisión de la formulaciones existentes. En: *Libro de resúmenes de las VI Jornadas Españolas de Ingeniería de Costas y Puertos*: 61.
- Gómez-Pina, G. (1995): *Análisis de perfiles de playa en las fachadas cantábrica y atlántica de la costa española y su aplicación a proyectos de regeneración*. Tesis de licenciatura, Univ. de Cantabria, 271 p.
- González Rodríguez, E. M. (1995): *Morfología de playas en equilibrio, planta y perfil*. Tesis doctoral, Univ. de Cantabria, 270 p.
- Hanson, H. y Kraus, N. C. (1989): GENESIS: Generalized model for simulated shoreline change. *Technical report CERC-89-19*, 185 p.
- Horikawa, K. y C.T. Kuo, (1966): A study of wave transformation inside the surf zone. En: *Proceedings 10th Int. Conf. Coastal Engineering*, ASCE: 217-233.
- Inman, D. L., Hany, M., Elwany, S., y Jenkins, S. C. (1993): Shorerise and Bar-Berm Profiles on Ocean Beaches. *Journal of Geophysical Research*, 98, C10: 18.181-18.199.
- Komar, P. D. y McDougal, W. G. (1994): The analysis of exponential beach profiles. *Journal of Coastal Research*, 10-1: 59-69.
- Larson, M. (1991): Equilibrium profile of a beach with varying grain size. En: *Proceedings of Coastal Sediments '91*: 905-919.
- Larson, M. y N. C. Kraus, (1989): SBEACH: Numerical modelling to simulated storm-induced beach change. *Technical Report CERC-89-9*, 256 p.
- Masselink, G. y A. D. Short, (1993): The effect of tide range on beach morphodynamics and morphology: a conceptual beach model. *Journal of Coastal Research*, 9: 785-800.
- Meyer-Peter, E. y Müller, R. (1948): Formulas for bed-load transport. En: *Rep. 2nd Meeting International Association of Hydraulic Structures Research*: 39-64.
- MOPTMA, (1991): *Recomendaciones para obras marítimas, ROM 0.3-91 Oleaje. Anejo I: Clima Marítimo en el Litoral Español*.
- Muñoz-Pérez, J. J. (1996): *Análisis de la morfología y variabilidad de playas apoyadas en lajas rocosas*. Tesis doctoral, Univ. de Cádiz, 190 p.

- Muñoz-Pérez, J.J., Tejedor, L. y Medina, R. (1999): Equilibrium beach profile model for reef-protected beaches. *Journal of Coastal Research*, 15: 950-957.
- Pilkey, O. H., Young, R. S., Riggs, S. R., Smith, A. W. S., Wu, H. y Pilkey, W. D. (1993): The concept of shoreface profile of equilibrium: A critical review. *Journal of Coastal Research*, 9-1: 255-278.
- Shields, A. (1936): Anwendung der Aehnlichkeitsmechanik und turbulenzforschung auf die Geschiebebewegung. *Mitt Preuss Versuchsanstalt fur Wasserbau und Schiffbau*, nº 26.
- Thieler, E. R., Brill, A. L., Hobbs, C. H. y Gammisch, R. (1995): Geology of the Wrightsville Beach, North Carolina shoreface: Implication of the concept of shoreface profile of equilibrium. *Marine Geology*, 126: 271-287.
- Thieler, E. R., Pilkey, O. H., Young, R. S., Bush, D. M. y Chai, F. (2000): The use of mathematical models to predict beach behaviour for U. S. coastal engineering: A critical review. *Journal of Coastal Research*, 16-1: 48-70.
- Thorton, E. B. y Guza, R. T. (1983): Transformation of wave height distribution. *Journal of Geophysical Research*, 18: 5.925-5.938.
- Van Rijn, L. C. (1984): Sediment transport: part I: bed load transport; part II: suspended load transport; part III: bed forms and alluvial roughness. *Journal of Hydraul. Div., Proc. ASCE*, 110 (HY10), 1431-1456; (HY11), 1613-1641; (HY12), 1733-1754.
- Wright, L.D. y A. D. Short, (1984): Morphodynamic variability of surf zone and beaches: a synthesis. *Marine Geology*, 56: 93-118.
- Manuscrito recibido el 3 de julio de 2001
Aceptado el manuscrito revisado el 31 de octubre de 2001